

# 宽带微波频谱分析仪频响补偿方法的改进

侯月振 邓旭亮

(中国电子科技集团公司第四十一研究所 青岛 266555)

**摘要:**在对宽带微波频谱分析仪的频率响应进行补偿时,传统的频响补偿方法用时较长,不利于频谱分析仪的大批量生产,因此需要对其进行优化改进以提高频响补偿的效率。首先从3个方面对频响补偿用时较长的原因进行了分析;其次给出相应的改进措施:调整频响补偿系统频点的切换顺序、提高频点切换程控指令的执行效率、动态判断信号源频点切换后输出功率的稳定状态。实验表明,对传统的频响补偿方法进行改进后,补偿时间大幅度减少,频响补偿的效率得到显著提高。

**关键词:**频率响应;补偿;改进;效率

**中图分类号:** TM935.21 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

## Improvement of the method of frequency response compensate in wideband microwave spectrum analyzer

Hou Yuezhen Deng Xuliang

(The 41st Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China)

**Abstract:** The traditional method would take a long time in the process of frequency response compensate in wideband microwave spectrum analyzer, and was not beneficial to produce spectrum analyzer on a large scale. So it should be improved to increase efficiency. First, analyzes the reason why the process of frequency response compensate spends longer time from three aspects; second, proposes the relative improvement measures: change the switch order of frequency point in frequency response compensate system, increase the execution efficiency of remote control commands, judge the stable state of output power dynamically of signal source after the frequency point was switched. It is proved that after the traditional method of frequency response compensate was improved, compensate time greatly reduced, and the efficiency has significantly increased.

**Keywords:** frequency response; compensation; improve; efficiency

### 1 引言

宽带微波频谱分析仪由于硬件自身的特性,使得测量频率不同时,其幅度值也不相同,并且没有规律性,该特性称之为频率响应<sup>[1]</sup>。为保证频谱分析仪的幅度测量精度,需要对其频率响应进行补偿。

当输入衰减为10 dB时,源负载与混频器之间的阻抗匹配和信噪比会达到最佳<sup>[2]</sup>,因此传统的宽带微波频谱分析仪以输入衰减10 dB为参考档进行频响补偿。因为其频率测量范围高达几十GHz;并且为了保证频响补偿的精度,补偿频点的间隔又不能太大,通常采用每隔100 MHz取一个频点进行补偿,补偿频点会多达几百个<sup>[3]</sup>;传统的频响补偿过程设计流程为了简单可靠,是逐一自动补偿系统中的每个设备进行控制和判断,待前一

个设备稳定后再操作下一个,并且为了适应较多不同厂商的设备而采取了较多的保留时间,虽然流程简单,但是执行效率不高。在大批量生产时,除无法满足生产需求外,还因占用设备资源而导致其他生产延滞。基于上述原因,本文对影响频响补偿过程时间的原因进行分析,给出优化改进措施以提高频响补偿效率。

### 2 原因分析及改进措施

为提高生产效率和降低生产成本<sup>[4]</sup>,使用信号源、功率计、频谱分析仪和功分器、GPIB总线<sup>[5]</sup>等搭建频响补偿系统,可自动完成频谱分析仪整个频段内的频响补偿<sup>[6]</sup>,频响补偿系统如图1所示。其中信号源产生频响补偿频率点的激励信号,功分器将信号源输出的激励信号等分为功率相等的两路,分别提供给频谱分析仪和功率计,功率

收稿日期:2016-04

计对频谱分析仪测得的信号功率进行定标。测量过程中将频谱分析仪的 10 MHz 时钟输出信号作为信号源锁相参考信号<sup>[7]</sup>。

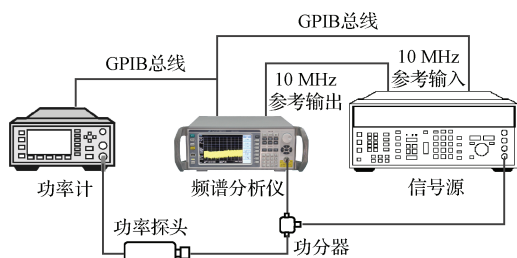


图1 频响补偿系统

图1所示的频响补偿系统,频谱分析仪做为主控设备,通过向信号源和功率计发送符合 SCPI99 规范<sup>[8]</sup>的 SCPI 指令实现信号源和功率计频点的切换、信号源输出功率的设置等操作,并且切换信号源和功率计的频点,功率输出稳定以后再行频响补偿<sup>[9]</sup>。本研究对传统的频响补偿过程进行尝试优化,变多个设备的逐次操作改为尽可能并行操作,变被动等待改为动态判断。具体如图2所示。

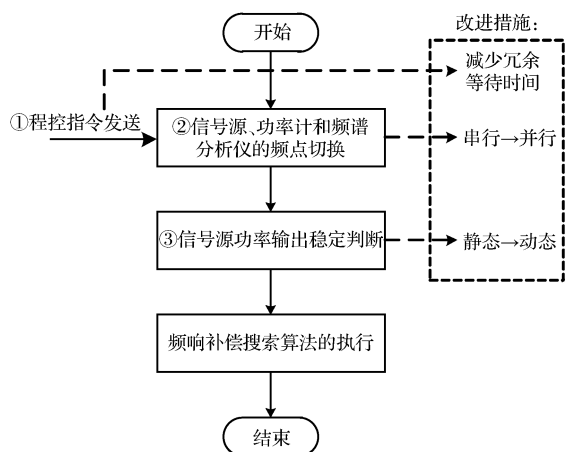


图2 频响补偿用时过长的环节及改进措施

下面对图2中的①、②、③进行具体的分析:

①减少冗余等待时间,提高频点切换程控指令的执行效率。

原设计中,频谱分析仪每次向信号源和功率计发送程控指令时,为保证被控设备能完整接收到主控设备发来的程控指令,首先固定延迟 100 ms,再使用 Windows API 函数 WaitForSingleObject(hObject, dwMilliseconds)<sup>[10]</sup> 等待数据发送完成事件。一般的,频谱分析仪“设置”类程控指令发送时间  $T < 100$  ms,因此至少造成  $(100 - T)$  ms 时间的浪费。将固定延迟时间叠加到该函数的第二个形参上,即 WaitForSingleObject(hObject, dwMilliseconds + 100),能够提高频点切换程控指令的执行效率;

②将信号源、功率计和频谱分析仪频点切换顺序由串行改为并行。

若先切换信号源和功率计的频点,当频谱分析仪切换频点后,其与功率计之间还存在阻抗匹配问题,功率计需再次进行校准,导致了频响补偿系统频点切换时间的延长,因此原设计中频响补偿系统的频点切换顺序为频谱分析仪频点、信号源和功率计。但是信号源频点切换以后,其功率输出进入稳定状态需要一个较长的时间,在此期间能够完成功率计和频谱分析仪的频点切换以及阻抗匹配问题。因此调整频响补偿系统的频点切换顺序为信号源、功率计和频谱分析仪,使信号源功率输出稳定过程和频谱分析仪、功率计频点的切换过程并行执行,从而减少频响补偿系统频点切换的总时长。

③改变信号源输出功率的比较门限,动态判断信号源输出功率的稳定状态。

原设计中,静态等待信号源功率输出稳定的实现过程如下:

1)延时 650 ms,读取功率计读数  $P_M$ ,计算功率计标称值  $P_{nom}$  与  $P_M$  的差值  $\Delta P = P_{nom} - P_M$ ,若  $\Delta P$  的绝对值大于 0.1 dB,则执行步骤 2);若  $\Delta P$  的绝对值不大于 0.1 dB,则认为信号源功率输出已经稳定;

2)设置信号源的输出功率为  $P_S + \Delta P$ ,重复步骤 1)。

若信号源功率输出稳定时间  $T_1 < (n \times 650)$  ms ( $n = 1, 2, \dots, n \in$  正整数),则会造成  $(n \times 650 - T_1)$  ms 时间的浪费,并且由于信号源本身的特性,频繁的调整信号源的功率也会延长功率输出的稳定时间,因此将信号源输出功率的比较门限由 0.1 dB 增大到 2 dB,并将“静态等待信号源功率输出稳定”方法改为“动态判断信号源功率是否稳定”的方法,具体的实现过程如下:

1)读取功率计读数  $P_M$ ,计算  $P_M$  与功率计标称值  $P_{nom}$  的差值  $\Delta P = P_{nom} - P_M$ ,若  $\Delta P$  的绝对值不大于 2 dB,则执行步骤 3);若  $\Delta P$  的绝对值大于 2 dB,则执行步骤 2);

2)设置信号源的输出功率为  $P_S + \Delta P$ ,重复步骤 1);直至  $\Delta P$  的绝对值不大于 2 dB,然后执行步骤 3);

3)记录此次的功率计读数为  $P_{ML}$ ,延时 50 ms,再次读取功率计读数  $P_M$ ,计算  $P_{ML}$  与  $P_M$  的差值  $\Delta P_1 = P_{ML} - P_M$ ,若  $\Delta P_1$  的绝对值不大于 0.1 dB,则认为信号源功率输出已经稳定;若  $\Delta P$  的绝对值大于 0.1 dB,则重复步骤 3)。

频响补偿过程改进前后的流程图分别如图 3(a)、(b)所示。

### 3 改进前后结果对比

上述的改进措施已经在中国电子科技集团公司第四十一研究所某型号频谱分析仪进行了验证,在输入衰减为 10 dB、频率测量范围为 30 Hz~26.5 GHz,改进前后频响补偿使用的时间如表 1 所示。

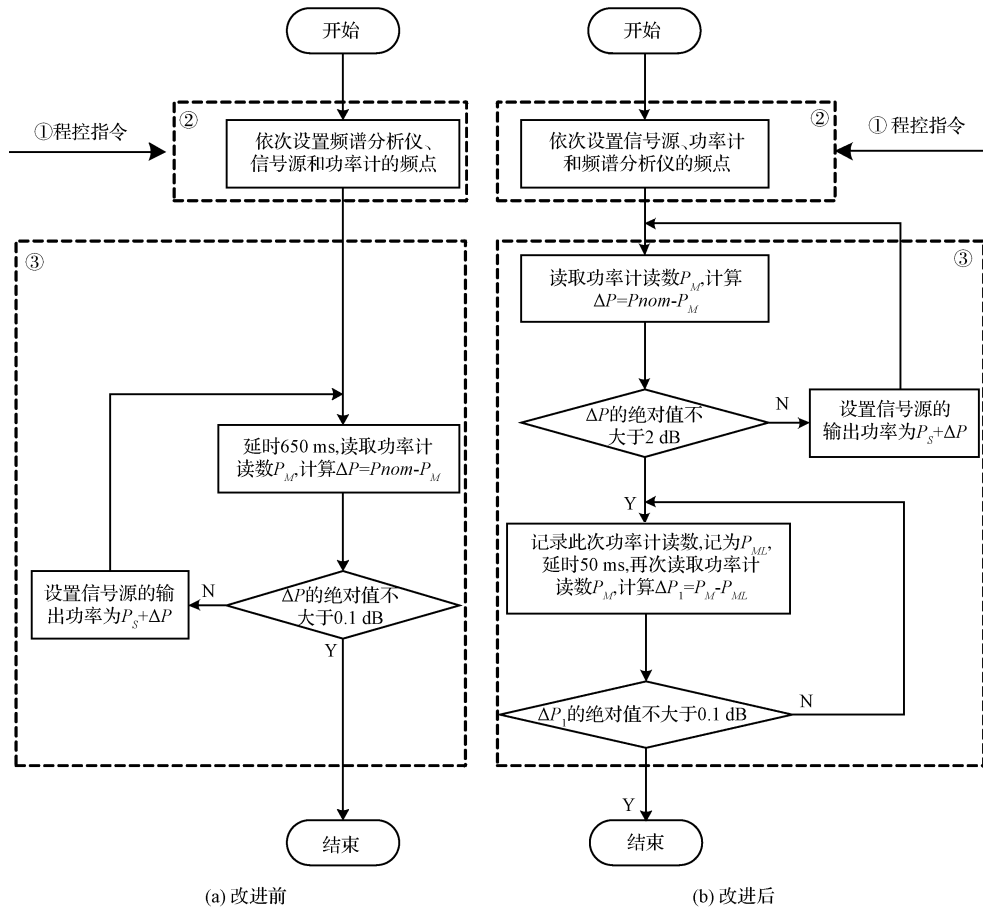


图3 改进前后的频响补偿过程流程

表1 相同数量频点频响补偿使用时间对比

改进环节	③	②+③	①+②+③
改进前时间/s	848	848	848
改进后时间/s	426	402	235
提升效率(%)	49.77	52.59	72.29

表1中的①、②、③与图2中的①、②、③相对应。由表1可知:上述3个环节都对频响补偿的效率产生了影响,其中最主要的是①和③,在保证频响补偿精度的前提下,同时对3个环节进行改进,频响补偿用时大大减少,补偿效率得到显著提高。

#### 4 结论

针对传统宽带微波频谱分析仪,本文从3个方面对传统频响补偿方法进行了分析,并进行优化改进。每种改进都对补偿速度有所提升,其中对补偿用程控指令的执行效率和补偿环境稳定性判断标准的优化改进效果较为显著,分别达到19.7%和49.77%。这些优化改进措施对其他类测量仪器的频响补偿过程也具有一定的借鉴意义。

本研究只涉及了频谱分析仪的自动频响补偿,对生产中的其他校准环节拟将采用本文中的同样方法进行优化验证,以全面提升生产效率。

#### 参考文献

- [1] Agilent Technologies Inc. Agilent spectrum analysis basics application note 150[Z]. USA, 2006:60-63.
- [2] 罗艳丽. 频谱分析仪幅度自动校准系统软件设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2013:9-12.
- [3] 郝妍,任水生. 频谱分析仪频响补偿技术[J]. 仪器仪表学报,2010,31(增刊):15-17.
- [4] 王爽. 自动测试无处不在之军民融合[J]. 国外电子测量技术,2014,33(6):7-9.
- [5] ANSI/IEEE STD 488. 1-2003. IEEE Standard for higher performance protocol for the standard digital interface for programmable instrumentation [S]. USA, US-ANSI,2003.
- [6] 郑敬华,刘晨,高超. 一种基于 GPIB 的自动测试系统实现方法研究[J]. 信息通信,2012(1):90-91.
- [7] 刘严严. 频谱分析仪参数自动测试系统研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2007:16-18.

(下转第81页)

参考文献

- [1] 刘岩俊. 基于 DSP 的嵌入式温度测量系统设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(12): 78-81.
- [2] 黄强, 腾召胜, 唐享, 等. 电子分析天平温度漂移补偿算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 1987-1995.
- [3] CHEN G Y, DU L B, HE H J, etc. Research on key techniques of expendable conductivity temperature depth measuring system[J]. Instrumentation, 2015, 1(2): 18-27.
- [4] 刘明亮, 朱江森. 数字信号处理对电子测量与仪器的影响研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10): 1041-1046.
- [5] 方益喜, 雷开卓, 屈健康, 等. 基于 PT1000 的高精度温度测量系统[J]. 电子设计工程, 2010, 18(10): 79-82.
- [6] 李云辉, 王晓东, 朱晓明. 基于 NTC 的非平衡桥式测温电路的误差分析[J]. 电子测量技术, 2015, 38(11): 51-54.
- [7] 李纪莲, 曹聚亮, 张开东. 航空重力测量应用中高精

测温电路精度研究[J]. 测试技术学报, 2010, 24(2): 128-132.

- [8] 王永成, 党源源, 徐抒岩, 等. 容差分析在空间光学遥感器测温电路中的应用[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1333-1339.
- [9] 郑晓文, 郑红. 工作电流对热敏电阻测温的影响[J]. 宇航计测技术, 2001, 21(4): 44-51.
- [10] 刘利峰. 单片精密仪器仪表放大器应用电路[J]. 国外电子测量技术, 2003, 22(1): 29-30.
- [11] 胡军柯. 电流测量电路的误差补偿和降噪技术的研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [12] 庄严, 段慧达. 误差分配与合成在智能仪器中的设计与应用[J]. 测量与设备, 2002(6): 9-10.

作者简介

何云丰, 1989 年出生, 工学硕士, 研究实习员, 主要研究方向为空间光学遥感器电子学系统设计。

E-mail: hyf421@163.com

(上接第 72 页)

- [8] 胡敏. Web 系统下提高 MySQL 数据库安全性的研究与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [9] 黄兮. 基于电子交易的农产品溯源模型的设计与实现[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2009.
- [10] 赖武光. 基于 LabVIEW 的温度监控系统软件设计[J]. 科技与创新, 2016(1): 68-69.
- [11] SINGLA S K, YADAV R K. Optical character recognition based speech synthesis system using LabVIEW[J]. Journal of Applied Research & Technology, 2014, 12(5): 919-926.
- [12] 李红刚. 基于单片机和 LabVIEW 的多路数据采集系

统设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(4): 62-67.

- [13] 戴冬冰, 刘正光. 基于虚拟仪器的大功率高精度电子负载[J]. 仪表技术与传感器, 2015(9): 40-43.
- [14] 何杰. 基于关系型数据库的单元测试的研究与实践[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.

作者简介

陈硕章, 1994 年出生, 本科在读, 主要研究方向为测控技术、虚拟仪器和信号处理。

E-mail: chenshuozhang1234@126.com

(上接第 75 页)

- [8] Standard commands for programmable instruments[S]. USA, SCPI, Consortium, 1999.
- [9] 韩桂芬. 采用频谱分析仪测量信号源功率电平及校准不确定度[J]. 现代电信科技, 2006(5): 49-51.
- [10] JEFFERY. WINDOWS 核心编程[M]. 第 5 版. 北京: 清华大学出版社, 2008: 232-233.

作者简介

侯月振, 1983 年 3 月出生, 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为电子测量仪器的程控设计。

E-mail: lao\_hou1983@163.com